



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**DESARROLLO DE UN MÉTODO DE PUESTA A
TIERRA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN**

Dario Ricardo Ortega Jaramillo

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica

Medellín, Colombia

2020



DESARROLLO DE UN MÉTODO DE PUESTA A TIERRA EN REDES DE
DISTRIBUCIÓN

Dario Ricardo Ortega Jaramillo

Informe de práctica
Como requisito para optar al título de:
Ingeniero Electricista

Asesor:

Álvaro Jaramillo Duque
Ingeniero Electricista

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica.
Medellín, Colombia

2020

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE PUESTA A TIERRA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

1. Resumen

La Empresa de Energía del Bajo Putumayo no contaba con un método para el diseño de puesta a tierra para redes de distribución, lo cual causaba posibles sobredimensionamientos en el sistema de puesta a tierra debido a que se agregaban electrodos de forma arbitraria sin conocer los efectos que estos tenían, ocasionando costos innecesarios. Además, dado que no se contaba con una herramienta que permitiera el cálculo de tensiones de paso y de contacto, éstas posiblemente no se estaban garantizando lo que podría ocasionar accidentes.

En este método se plantean diferentes diseños de sistemas de puesta a tierra que cumplan con lo establecido en las normas vigentes. Además, se implementa el diseño y se mide la resistencia de puesta en el lugar mediante un telurómetro para comparar los resultados de resistencia de puesta a tierra calculada y medida obteniendo valores aproximados. Validando el método planteado y la herramienta computacional desarrollada.

2. Introducción

El departamento del Putumayo está ubicado al suroeste del país, en la región Amazónica, su capital es el municipio de Mocoa y el municipio que cuenta con una mayor población es Puerto Asís. Limita al sur con Perú y Ecuador, al norte con el departamento del Cauca y Caquetá, al este con Amazonas y al oeste con Nariño. El departamento del Putumayo tiene 13 municipios, que se agrupan en tres subregiones que son, alto Putumayo, medio Putumayo y bajo Putumayo.

En el departamento del Putumayo existen dos empresas prestadoras del servicio de energía. La empresa de Energía del Bajo Putumayo es una empresa privada que brinda el servicio de distribución y comercialización de energía con calidad y eficiencia a los municipios del bajo Putumayo y

parte del medio Putumayo, su sede principal está ubicada en el municipio del Puerto Asís y otra en el municipio del Valle del Guamuez. La empresa debe contar con diferentes instructivos, procedimientos y manuales donde se especifican por ejemplo el uso correcto de los instrumentos de medida, instalación o cambio de diversos elementos que conforman la red eléctrica.

Actualmente la empresa no cuenta con un método específico para sistemas de puesta a tierra para redes de eléctricas de distribución, por lo tanto, los operarios que realizan esta labor lo hacen según la experiencia adquirida a lo largo de los años, en algunos casos sin ningún estudio previo de las condiciones del suelo. La Empresa toma como referencia los valores de sistemas de puesta a tierra establecidos en el RETIE. Generalmente solo se instala un electrodo y a veces dos para tratar de obtener el valor de resistencia establecido. Sin embargo, en muchas ocasiones con dos electrodos no es suficiente para obtener el valor de resistencia deseado y si se agregan arbitrariamente más electrodos sin un análisis de sus efectos puede resultar en un sobredimensionamiento del sistema de puesta a tierra, lo que ocasiona gastos incensarios.

Para el desarrollo del método de puesta a tierra en redes de distribución se tomará como referencia lo establecido en la IEEE-80, IEEE-81 y en el RETIE. En este método se describirá un paso a paso para realizar el diseño de puesta a tierra que cumpla con los requerimientos existentes en las normas vigentes en Colombia. Además, con base a lo establecido en el método se desarrolló una herramienta computacional que permite obtener de forma sencilla el diseño de un sistema de puesta a tierra para redes de distribución.

Al tener un correcto diseño de puesta a tierra en los sistemas de distribución se protege la vida de las personas, ya que se pueden presentar accidentes provenientes de tensiones de paso y contacto. También se logra la protección de los equipos que se encuentran conectados al sistema de puesta tierra, evitando daños irreparables y costosos.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Desarrollar un método para el diseño de puestas a tierra en redes de distribución eléctrica, para la Empresa de Energía del Bajo Putumayo, considerando las normas vigentes en Colombia.

3.2 Objetivos específicos

Realizar una búsqueda de información técnica respecto al diseño de los sistemas de puesta a tierra en redes de distribución, teniendo como referencia las normas nacionales e internacionales.

Desarrollar un método para el diseño de puestas a tierra en redes de distribución eléctrica según la información técnica y normas vigentes.

Implementar y documentar una herramienta computacional para el diseño de puestas a tierra en redes de distribución eléctrica, según la información técnica y normas vigentes.

Socializar al interior de la empresa el método donde se describirá el paso a paso para el diseño de puesta a tierra y el funcionamiento de la herramienta computacional desarrollada.

Calcular, diseñar y determinar la resistencia de puesta a tierra acorde a las normas vigentes colombianas.

4. Marco Teórico

En Colombia, el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE, define un sistema de puestas a tierra como un conjunto de elementos conductores continuos de un sistema eléctrico específico, sin interrupciones, que conectan los equipos eléctricos con el terreno o una masa metálica. Comprende la puesta a tierra y la red equipotencial de cables que normalmente no conducen corriente [1].

Los objetivos de un sistema de puesta a tierra (SPT) son: La seguridad de las personas, la protección de las instalaciones y la compatibilidad electromagnética [1].

Las funciones de un sistema de puesta a tierra según el RETIE son:

- Garantizar condiciones de seguridad a los seres vivos.
- Permitir a los equipos de protección despejar rápidamente las fallas.
- Servir de referencia común al sistema eléctrico.
- Conducir y disipar con suficiente capacidad las corrientes de falla, electrostática y de rayo.
- Transmitir señales de RF en onda media y larga.
- Realizar una conexión de baja resistencia con la tierra y con puntos de referencia de los equipos.

Se debe tener presente que el criterio fundamental para garantizar la seguridad de los seres humanos es la máxima energía eléctrica que pueden

soportar, debida a las tensiones de paso, de contacto o transferidas y no el valor de resistencia de puesta a tierra tomado aisladamente. Sin embargo, un bajo valor de la resistencia de puesta a tierra es siempre deseable para disminuir la máxima elevación de potencial [1].

A continuación, se definen algunos términos y conceptos necesarios para el desarrollo de este proyecto.

4.1 Resistividad del terreno

“Representa la resistencia específica del suelo a cierta profundidad, o de un estrato del suelo; se obtiene indirectamente al procesar un grupo de medidas de campo; su magnitud se expresa en (Ωm) o (Ωcm), es inversa a la conductividad. La resistividad eléctrica (ρ): Es la relación entre la diferencia de potencial en un material y la densidad de corriente que resulta en el mismo. Es la resistencia específica de una sustancia. Numéricamente es la resistencia ofrecida por un cubo de 1m x 1m x 1m, medida entre dos caras opuestas” [2].

El suelo es de naturaleza heterogénea, ya que presenta variaciones en su composición. Este se puede clasificar de diferentes formas, por ejemplo, en arcilloso, arenoso y rocoso, debido a esto no se puede atribuir una resistividad específica a un tipo de suelo.

Existen diferentes factores que afectan la resistividad del suelo, los más destacados son:

- Tipo de suelo.
- Mezcla de diversos tipos de suelos
- Suelos con capas estratificadas a profundidades y materiales diferentes.
- Contenido de humedad.
- Temperatura.
- Compactación y presión.
- Composición y concentración de sales disueltas.

La variación de resistividad por algunos de estos factores se aprecia en la Figura 1.

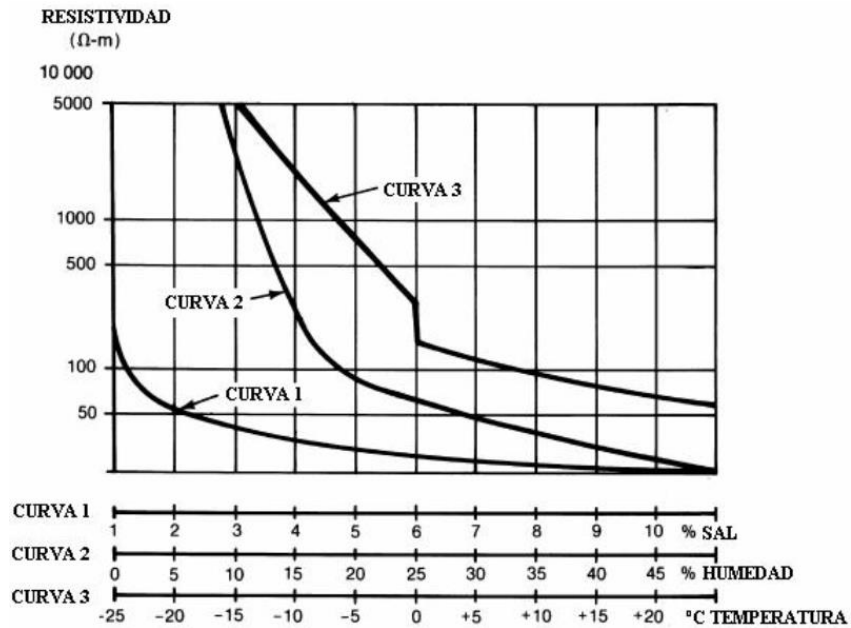


Figura 1. Variación de resistividad por diversos factores [2].

En la curva 1 de la Figura 1, se observa que al presentarse una mayor concentración de sales solubles en el suelo varía considerablemente la resistividad del suelo, ocasionando que esta vaya disminuyendo, este comportamiento es similar en la curva 2, donde al existir un porcentaje mayor de humedad la resistividad será menor. Por último de la curva 3 podemos deducir que al presentarse temperaturas mayores a 0 grados centígrados la resistividad del suelo comienza a tener valores bajos.

4.2 Medición de la resistividad del terreno

Las mediciones que se realizan de la resistividad del terreno ayudan a determinar las variaciones que pueden existir con respecto a la profundidad. Es posible que en los terrenos donde se están realizando las mediciones se presenten objetos tales como lo son rieles y tuberías que pueden generar una influencia en los resultados de las mediciones. Si se conoce la ubicación de dichos objetos se puede minimizar su efecto alineando las picas auxiliares de prueba en una dirección perpendicular al enrutamiento de estas estructuras.

Entre los principales métodos para la medición de la resistencia del terreno están:

4.2.1 Método de Wenner

El método de los cuatro puntos de Wenner es el método más preciso y popular. El método consiste en enterrar pequeños electrodos tipo varilla, en cuatro huecos en el suelo, a una profundidad "b" y espaciados (en línea recta) una distancia "a" como se ilustra en la Figura 2[2].

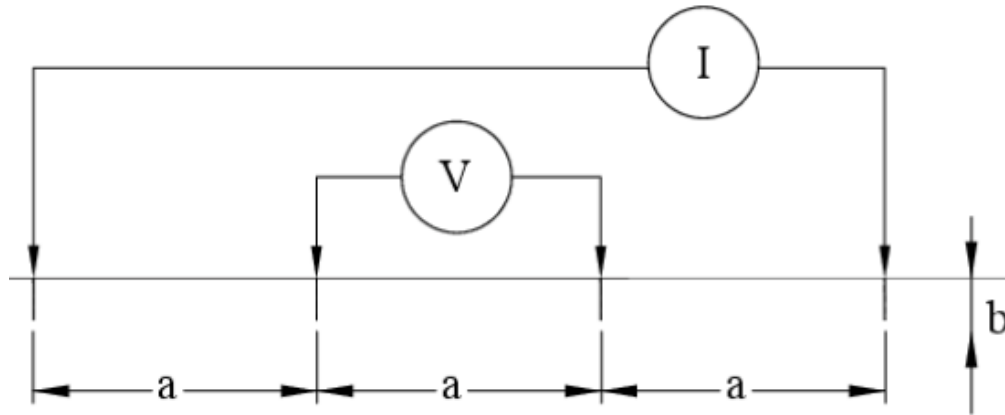


Figura 2. Método de Wenner [4].

“Una corriente “I” se inyecta entre los dos electrodos externos y el potencial “V” entre los dos electrodos internos es medido por el instrumento. El instrumento mide la resistencia $R (=V/I)$ del volumen de suelo cilíndrico de radio “a” encerrado entre los electrodos internos. La resistividad aparente del suelo ρ_a , a la profundidad “a” es aproximada por la ecuación (1) como se muestra a continuación” [2]:

$$\rho = \frac{4\pi Ra}{\left(1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}\right)} \quad (1)$$

Dado que en la práctica la distancia “a” es mucho mayor que la profundidad de enterramiento “b”, la ecuación se simplifica de la y se obtiene la ecuación (2).

$$\rho = 2\pi Ra \quad (2)$$

Para determinar el cambio de la resistividad del suelo con la profundidad, el espaciamento entre electrodos se varía desde unos pocos metros hasta un espaciamento igual o mayor que la máxima dimensión esperada del sistema de puesta a tierra (por ejemplo, la mayor distancia posible entre 2 puntos de una malla, o la profundidad de las varillas). El espaciamento “a” del electrodo se interpreta como la profundidad aproximada a la cual se lee la resistividad del suelo. Para caracterizar la variación de la resistividad

del suelo dentro de un área específica, se deben realizar varios grupos de medidas (perfiles) en diferentes direcciones.

Las lecturas obtenidas mediante este método se pueden graficar y de esta manera se puede estimar si el terreno posee diferentes capas y se tiene una idea de sus respectivas resistividades y profundidades. Para realizar esta grafica se usa las resistividades obtenidas versus la separación de los electrodos, como se indica en la Figura 3.

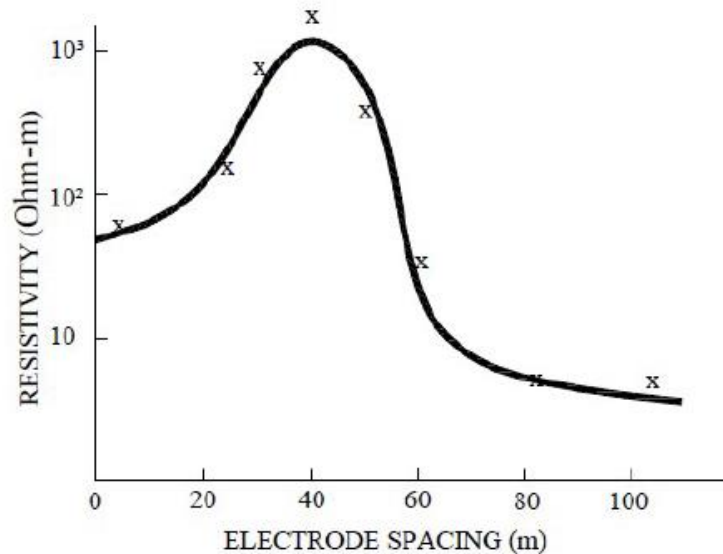


Figura 3. Curva de resistividad típica [4].

4.2.2 Espaciamiento desigual o Schlumberger

Este método es similar al de Wenner ya que también emplea 4 electrodos, la diferencia radica en que los electrodos de prueba no tienen el mismo espaciamiento entre ellos. Además, al momento de realizar las mediciones la separación entre los electrodos centrales se mantiene constante, y se varía la distancia entre los electrodos exteriores, esta configuración se la puede observar en la figura 4.

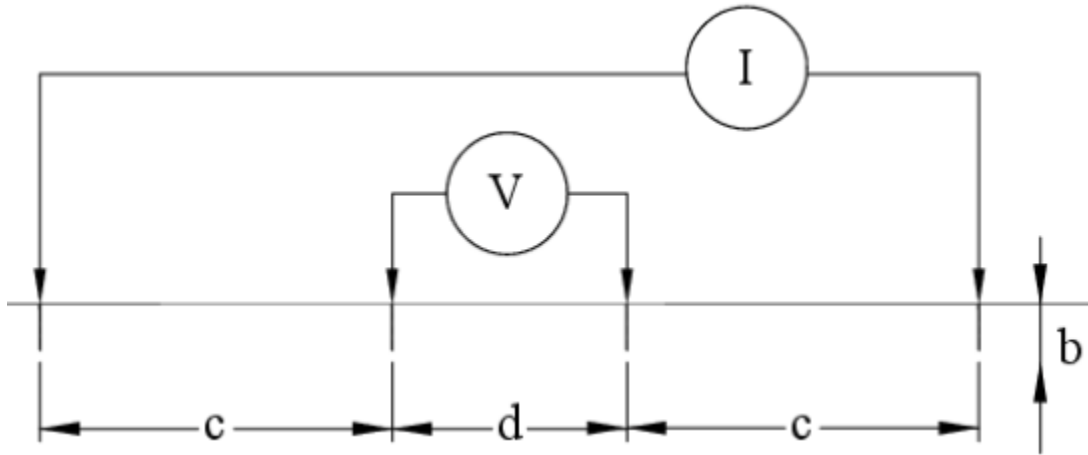


Figura 4. Método de Schlumberger [4].

4.3 Modelo de terreno

El modelo del terreno será solo una aproximación de las verdaderas condiciones del terreno. Los modelos de resistividad del terreno más utilizados son el modelo de terreno uniforme y el modelo de dos capas. En los casos donde la resistividad del terreno presente mínimos y máximos un modelo de dos capas no puede ser un modelo preciso. Por lo tanto, se opta por un modelo de terreno multicapas mediante el uso de programas informáticos.

4.3.1 Modelo de terreno uniforme

Este modelo se puede utilizar cuando existen pequeñas variaciones en la medición de la resistividad aparente del terreno obteniendo resultados razonablemente precisos. Si se presenta variaciones significativas en las mediciones de la resistividad aparente, este modelo no aplicaría debido a que se obtendrían resultados muy poco precisos.

La resistividad uniforme aproximada del terreno se puede obtener mediante una media aritmética de las resistividades aritméticas obtenidas tal como se indica en la ecuación (3).

$$\rho = \frac{\rho a(1) + \rho a(2) + \rho a(3) + \dots + \rho a(n)}{n} \quad (3)$$

Donde:

$\rho a(1), \rho a(2), \rho a(3) \dots \rho a(n)$, son los datos medidos de la resistividad aparente en el terreno [$\Omega \cdot m$].

n , es el número total de medidas.

4.3.2 Modelo de terreno de dos capas por método grafico

Mediante este modelo se puede obtener una representación más exacta acerca de las condiciones reales del terreno. El modelo de dos capas se modela con una capa superior de profundidad finita y otra capa inferior de espesor infinito con diferente resistividad a la capa superior.

Para determinar un modelo de dos capas a partir de la resistividad aparente obtenida de las pruebas de campo se puede hacer mediante diferentes técnicas. Una manera de hacerlo es mediante el método del gráfico de (Sunde) que se muestra en la Figura 5.

A continuación, se describen los pasos a seguir tomados de la IEEE-80 para determinar la profundidad de la capa superficial (h) mediante este método.

a) Dibujar la curva de resistividad aparente vs el espaciamiento de los electrodos de prueba.

b) De la curva trazada, se estima la resistividad de la capa superficial ρ_1 correspondiente a la menor separación entre los electrodos y la resistividad de la capa más profunda correspondiente a la mayor separación entre los electrodos.

c) Determine $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ y seleccione la curva correspondiente del grafico de Sunde que corresponde a la Figura 5. Si no se tiene la curva exacta se puede seleccionar la curva más cercana o se puede interpolar y dibujar una nueva curva en el gráfico.

d) Dentro de la región de la pendiente de la curva $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ escogida en c). Seleccione el valor de $\frac{\rho_a}{\rho_1}$ correspondiente al eje Y de la figura 5.

e) Leer el valor que corresponde a $\frac{a}{h}$ ubicado en el eje x de la Figura 5.

f) Encuentre ρ_a Multiplicar el valor encontrado de $\frac{\rho_a}{\rho_1}$ por ρ_1 .

g) Mediante el valor obtenido de ρ_a en f), se lee de la curva trazada en a) la separación de los electrodos de prueba a .

h) Calcular el valor de h , multiplicado a por $\frac{a}{h}$.

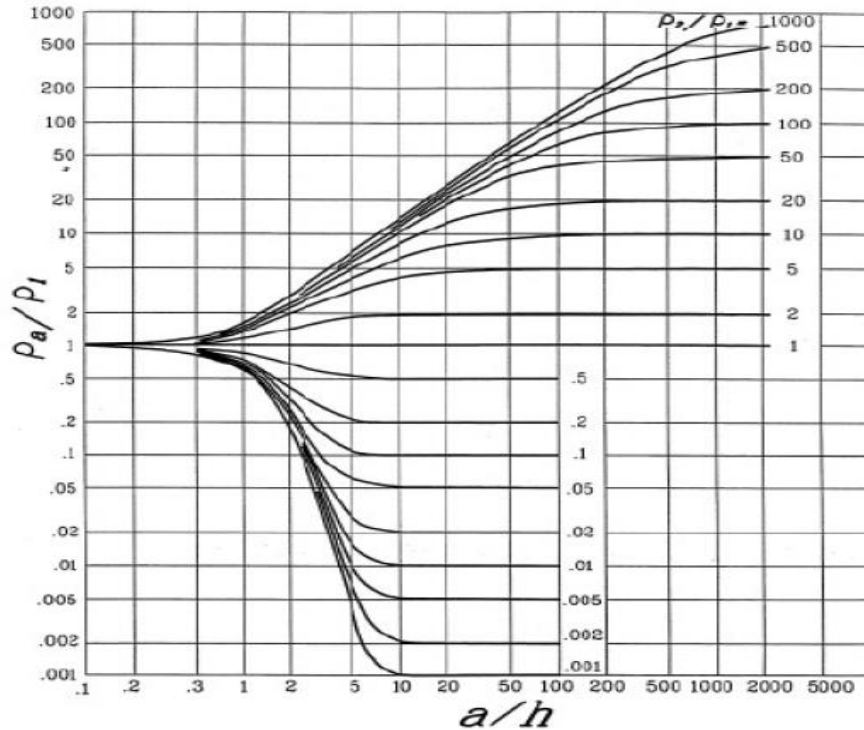


Figura 5. Grafica de Sunde [3].

4.4 Cálculo del calibre del conductor

Para realizar el cálculo de la sección transversal del conductor se aplica ecuación (4), donde la corriente de falla deberá ser la máxima corriente de falla esperada que puede ser conducida por cualquier conductor del sistema de tierra, y el tiempo t_c , debe reflejar el tiempo de despeje máximo posible.

$$A_{mm^2} = \frac{I_F}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r}\right) \cdot \ln\left(\frac{k_0 + T_m}{k_0 + T_a}\right)}} \quad (4)$$

I_F es la máxima corriente de falla asimétrica [kA].

A_{mm^2} es la sección transversal del conductor [mm^2].

T_m es la temperatura máxima permisible de fusión [°C].

T_a es la temperatura ambiente [°C].

T_r es la temperatura de referencia de constante de materiales [°C].

α_0 es el coeficiente térmico de resistividad a 0 °C [1/°C].

α_r es el coeficiente térmico de resistividad a la temperatura de referencia T_r [$1/^\circ\text{C}$].

ρ_r es la resistividad del conductor de tierra a la temperatura de referencia T_r [$\mu\Omega \cdot \text{cm}$].

k_o es $1/\alpha_o$ o $(1/\alpha_o) \cdot T_r$ [$^\circ\text{C}$].

t_c es la duración de la corriente de falla [s].

TCAP es el factor de capacidad térmica por unidad de volumen obtenido de la Tabla 1 [$\text{J}/(\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$].

Description	Material conductivity (%)	α_r factor at 20 $^\circ\text{C}$ ($1/^\circ\text{C}$)	K_o at 0 $^\circ\text{C}$ (0 $^\circ\text{C}$)	Fusing ^a temperature T_m ($^\circ\text{C}$)	ρ_r 20 $^\circ\text{C}$ ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	TCAP thermal capacity [$\text{J}/(\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$]
Copper, annealed soft-drawn	100.0	0.003 93	234	1083	1.72	3.42
Copper, commercial hard-drawn	97.0	0.003 81	242	1084	1.78	3.42
Copper-clad steel wire	40.0	0.003 78	245	1084	4.40	3.85
Copper-clad steel wire	30.0	0.003 78	245	1084	5.86	3.85
Copper-clad steel rod ^b	20.0	0.003 78	245	1084	8.62	3.85
Aluminum, EC grade	61.0	0.004 03	228	657	2.86	2.56
Aluminum, 5005 alloy	53.5	0.003 53	263	652	3.22	2.60
Aluminum, 6201 alloy	52.5	0.003 47	268	654	3.28	2.60
Aluminum-clad steel wire	20.3	0.003 60	258	657	8.48	3.58
Steel, 1020	10.8	0.001 60	605	1510	15.90	3.28
Stainless-clad steel rod ^c	9.8	0.001 60	605	1400	17.50	4.44
Zinc-coated steel rod	8.6	0.003 20	293	419	20.10	3.93
Stainless steel, 304	2.4	0.001 30	749	1400	72.00	4.03

Tabla 1. Constantes de materiales [3].

Además, se debe tener en cuenta lo establecido en el Artículo 15. Puesta a Tierra, Numeral 15.3.1 Electrodo de puesta a tierra del RETIE, donde se establece que el área mínima para un conductor de cobre para la malla de puesta a tierra deber ser de 50 mm^2 .

4.5 Tensión de contacto

“Diferencia de potencial que durante una falla se presenta entre una estructura metálica puesta a tierra y un punto de la superficie del terreno a una distancia de un metro. Esta distancia horizontal es equivalente a la máxima que se puede alcanzar al extender un brazo “[1], un ejemplo es el mostrado en la Figura 6.

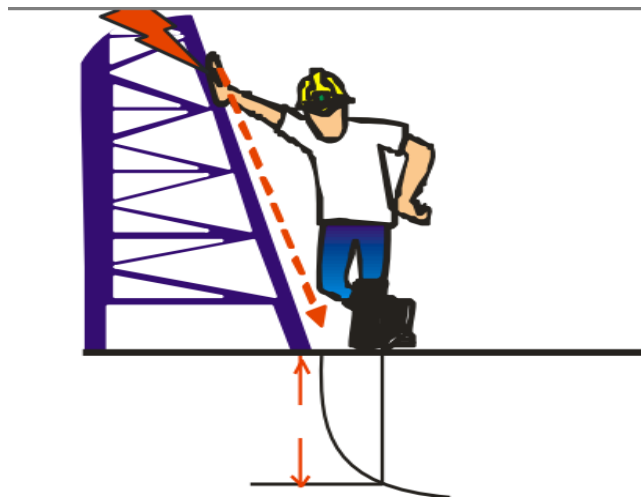


Figura 6. Tensión de contacto [1].

4.6 Tensión de paso

Según la norma IEEE-80 es “la diferencia de potencial de superficie que podría experimentar una persona con los pies separados a un metro de distancia sin tocar ningún objeto conectado a tierra” [3], como se evidencia en la Figura 7.

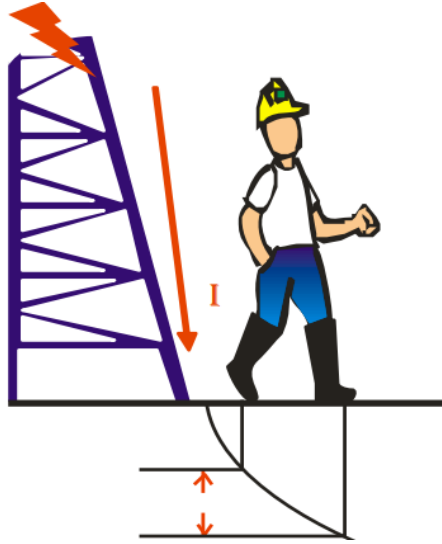


Figura 7. Tensión de paso [1].

4.7 Tensiones tolerables

Según lo establecido en la IEEE 80, las tensiones tolerables de paso y de contacto para un ser humano con pesos corporales de 50 kg y 70 kg se determinan por las ecuaciones (5), (6), (7) y (8).

Tensión de paso para una persona con peso corporal de 50 kg y 70 kg.

$$E_{paso50kg} = (1000 + 6C_s * \rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (5)$$

$$E_{paso70kg} = (1000 + 6C_s * \rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (6)$$

Tensión de contacto para una persona con peso corporal de 50 kg y 70 kg.

$$E_{contacto50kg} = (1000 + 1,5C_s * \rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (7)$$

$$E_{contacto70kg} = (1000 + 1,5C_s * \rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (8)$$

Donde:

E_{paso} es la tensión de paso [V].

$E_{contaco}$ es la tensión de paso [V].

C_s es calculada por la ecuación 9.

ρ_s es la resistividad de la capa superficial del terreno [$\Omega \cdot m$].

t_s es el tiempo de despeje de la falla [s].

La elección del tiempo t_s , se basa en el juicio del ingeniero de diseño, los valores típicos varían de 0.25 segundos a 1 segundo.

El factor C_s se calcula cuando se prevé el uso de una capa superficial (grava), este dependerá del espesor y resistividad del material, así como la resistividad del terreno, se calcula según la ecuación (9).

$$C_s = 1 - \frac{0,09(1 - \frac{\rho}{\rho_s})}{2h_s + 0,09} \quad (9)$$

Donde:

C_s es el factor de decremento de la capa superficial.

h_s es el espesor de la capa superficial [m].

ρ es la resistividad del terreno [$\Omega \cdot m$].

La capa superficial (grava), normalmente es de 0.10 m a 0.15 m de material de alta resistividad, usualmente se extiende sobre la superficie por encima de la malla de tierra para aumentar la resistencia de contacto entre el terreno y los pies de las personas.

Cuando no se tiene prevista una capa superficial (grava), entonces $C_s = 1$ y $\rho_s = \rho$.

4.8 Máxima elevación de potencial

Según la norma IEEE-81 se define como "El máximo potencial eléctrico que un electrodo de tierra, red o que el sistema podría alcanzar en relación con un punto de conexión a tierra distante que se supone que está al potencial de la tierra remota" [4].

4.9 Cálculo de la resistencia a tierra

Con base a lo establecido en la IEEE-80, el valor de la resistencia de puesta a tierra de una malla en un terreno uniforme es determinado mediante la ecuación (10).

$$R_g = \rho \left(\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right) \quad (10)$$

Donde:

R_g es la resistencia del sistema de puesta a tierra [Ω].

ρ es la resistividad del terreno [$\Omega \cdot m$].

L_T es la longitud total de los conductores enterrados (conductores horizontales + varillas verticales) [m].

h es la profundidad de la malla de tierra [m].

A es el área de la malla de tierra [m^2].

4.9.1 Ecuaciones de Schwarz

Schwarz estableció una serie de ecuaciones para determinar la resistencia total de un sistema de puesta a tierra en un terreno homogéneo formado por electrodos en disposición horizontal (conductores) y vertical (varillas). La resistencia total del sistema está dada por la ecuación (11).

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (11)$$

R_1 es la resistencia a tierra de los conductores de la malla [Ω].

R_2 es la resistencia a tierra de todas las varillas de tierra [Ω].

R_m es la resistencia mutua entre el grupo de conductores de la malla R_1 y el grupo de varillas R_2 , [Ω].

La resistencia a tierra de los conductores de la malla R_1 , se calcula mediante la ecuación (12), la resistencia de las varillas de la malla R_2 se calcula mediante la ecuación (13) y la resistencia mutua entre los conductores y las varillas de la malla se calcula mediante la ecuación (14), que se puede describir como la ecuación (15).

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{a'} \right) + \frac{k_1 * L_c}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \quad (12)$$

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_R L_r} \left[\ln \left(\frac{4L_r}{b} \right) - 1 + \frac{2k_1 * L_r}{\sqrt{A}} (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right] \quad (13)$$

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{L_r} \right) + \frac{k_1 * L_c}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right] \quad (14)$$

$$R_m = R_1 - \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{L_r}{\sqrt{h * 2a}} \right) - 1 \right] \quad (15)$$

Donde:

ρ es la resistividad del terreno [$\Omega \cdot m$].

L_c es la longitud total de todos los conductores conectados a la malla [m].

a' es $\sqrt{a * 2h}$ es para conductores enterrados a una profundidad h [m], o

a' es a para el conductor en la superficie de la tierra [m].

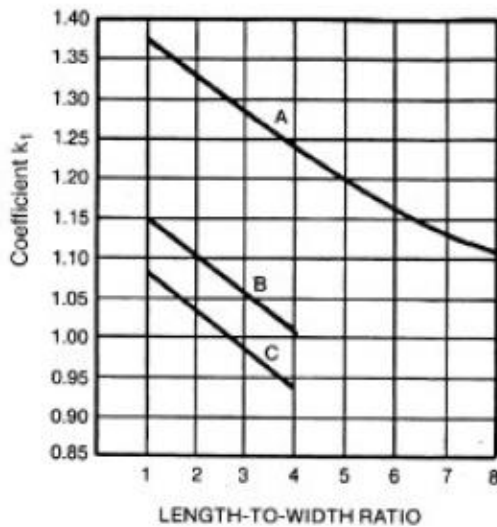
$2a$ es el diámetro del conductor [m].

A es el área cubierta por los conductores [m^2].

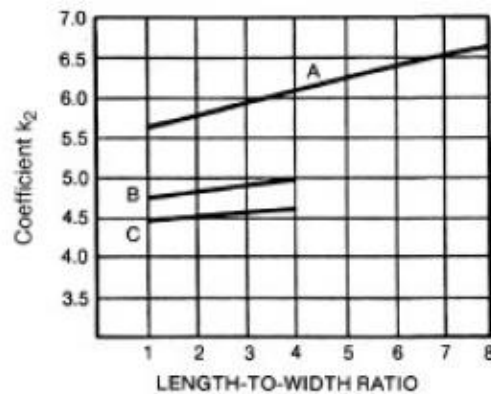
L_r es la longitud de cada varilla [m].

$2b$ es el diámetro de la varilla [m].

n_R es el número de varillas situadas en la zona A .



CURVE A — FOR DEPTH $h = 0$
 $y_A = -0.04x + 1.41$
 CURVE B — FOR DEPTH $h = 1/10 \sqrt{AREA}$
 $y_B = -0.05x + 1.20$
 CURVE C — FOR DEPTH $h = 1/6 \sqrt{AREA}$



CURVE A — FOR DEPTH $h = 0$
 $y_A = 0.15x + 5.50$
 CURVE B — FOR DEPTH $h = 1/10 \sqrt{AREA}$
 $y_B = 0.10x + 4.68$
 CURVE C — FOR DEPTH $h = 1/6 \sqrt{AREA}$

Figura 8. Coeficientes K_1 y K_2 de las fórmulas de Schwarz [3].

k_1, k_2 son coeficientes que se obtienen mediante las gráficas de la Figura 8.

En la Figura 8 se puede apreciar que tanto para obtener el coeficiente K_1 y K_2 existen tres curvas A, B y C. La curva A aplica cuando los conductores de la malla están sobre la superficie, la curva B aplica cuando el valor de profundidad (h) sea igual o se aproxime a la décima parte de la raíz del área de influencia de la malla y la curva C aplica cuando el valor de profundidad (h) sea igual o se aproxime a la sexta parte de la raíz del área de influencia de la malla.

4.9.2 Ecuaciones adicionales

Se definen las ecuaciones para calcular la resistencia del sistema de puesta a tierra de las configuraciones mostradas en la Figura 9, donde d es la **Cálculo de la resistencia para dos y tres varillas en disposición lineal.**

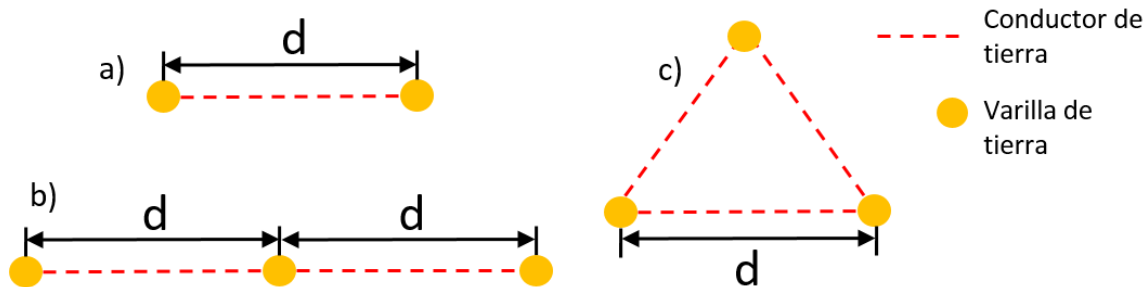


Figura 9. Configuraciones de puesta a tierra: a) Unión de dos varillas, b) Unión de tres varillas y c) unión de tres varillas en forma triangular.

Para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra para la disposición de dos y tres varillas en disposición lineal mostradas en la Figura 9 es necesario realizar modificaciones en las ecuaciones de Schwarz debido a que estas involucran un área y las disposiciones mencionadas en este apartado carecen de este parámetro. Por este motivo se toma la hipótesis planteada en [5] donde se toma la longitud total del conductor (L_c) como el perímetro de un cuadrado, por lo tanto, para obtener las constantes k_1 y k_2 de la Figura 8 se tendrá que $x=1$ y el valor de influencia será igual a $\left(\frac{L_c}{4}\right)^2$. Entonces, las ecuaciones para calcular la resistencia a tierra del conductor R_1 de la ecuación (12) y para calcular la resistencia a tierra de las varillas R_2 de la ecuación (13) se reescriben de la siguiente manera.

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{a'} \right) + 4k_1 - K_2 \right] \quad (16)$$

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_R L_r} \left[\ln \left(\frac{4L_r}{b} \right) - 1 + \frac{8k_1 * L_r}{L_c} (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right] \quad (17)$$

Donde:

R_1 es la resistencia a tierra del conductor [Ω].

R_2 es la resistencia a tierra de las varillas [Ω].

ρ es la resistividad del terreno [$\Omega \cdot m$].

L_c es la longitud del conductor [m].

a' es $\sqrt{a * 2h}$ es para conductores enterrados a una profundidad h [m], o

a' es a para el conductor en la superficie de la tierra [m].

a es el radio del conductor [m].

b es el radio de la varilla [m].

n_R es el número de varillas.

k_1, k_2 son coeficientes que se obtienen mediante las gráficas de la Figura 8.

4.9.2.1 Cálculo de la resistencia para tres varillas en disposición triangular.

Para el cálculo de la resistencia a tierra de una disposición triangular conformada por tres varillas mostrada en la figura 19 (c) se sigue la hipótesis planteada en [5] donde se asume que $x=1$ para obtener las constantes k_1 y k_2 , teniendo en cuenta lo expuesto a continuación "considerando que x es igual a uno siempre y cuando el largo y el ancho de una malla seas iguales, así mismo el triángulo equilátero no pierde su forma con cualquier valor de longitud de sus lados, por lo que se realiza una analogía entre estos parámetros". También se conoce que $n_R = 3$ y $L_c = 3d$, por lo tanto, las ecuaciones (12),(14) y (15) se reescriben como:

$$R_1 = \frac{\rho}{3\pi d} \left[\ln \left(\frac{6d}{a'} \right) + \frac{3k_1 * d}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \quad (18)$$

$$R_2 = \frac{\rho}{6\pi L_r} \left[\ln \left(\frac{4L_r}{b} \right) - 1 + \frac{2k_1 * L_r}{\sqrt{A}} (\sqrt{3} - 1)^2 \right] \quad (19)$$

$$R_m = R_1 - \frac{\rho}{3\pi d} \left[\ln \left(\frac{L_r}{\sqrt{h * 2a}} \right) - 1 \right] \quad (20)$$

Donde:

d es la distancia de separación de cada lado del triangulo $d > L_r$ [m].

Asi la resistencia de puesta tierra R_g , debe cumplir con los valores de referencia de resistencia de puesta a tierra, que se muestran en la Tabla 2.

APLICACIÓN	VALORES MÁXIMOS DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA
Estructuras y torrecillas metálicas de líneas o redes con cable de guarda	20 Ω
Subestaciones de alta y extra alta tensión.	1 Ω
Subestaciones de media tensión.	10 Ω
Protección contra rayos.	10 Ω
Punto neutro de acometida en baja tensión.	25 Ω
Redes para equipos electrónicos o sensibles	10 Ω

Tabla 2. Valores máximos de resistencia de puesta a tierra [1].

4.10 Corriente máxima de malla I_G

La corriente máxima de malla I_G , que puede propagarse en una malla de tierra en caso de falla, está determinada por la ecuación (21). Para evitar sobre dimensionar el sistema puesta a tierra, solamente se debe usar la parte de la corriente de falla que fluye a través de la malla de tierra.

$$I_G = D_f * I_g = D_f * S_f * I_f \quad (21)$$

I_G es la corriente máxima de malla [A].

I_g es el valor eficaz de la corriente simétrica en la malla [A].

D_f es el factor de disminución para toda la duración t_f de la falla.

S_f es el factor de división de corriente de falla.

I_f es el valor eficaz de la corriente de falla simétrica a tierra.

El factor D_f es usado para incluir el efecto de la componente DC. Este factor determina el equivalente rms (valor eficaz) de la onda de corriente asimétrica para una duración de falla determinada t_f , teniendo en cuenta el efecto de la componente DC inicial y su atenuación durante la falla. En la Tabla 3 se observan los valores de D_f .

Duración de falla, t_f		Factor de decremento, D_f			
Segundos	Ciclos a 60 Hz	$X/R = 10$	$X/R = 20$	$X/R = 30$	$X/R = 40$
0.00833	0.5	1.576	1.648	1.675	1.688
0.05	3	1.232	1.378	1.462	1.515
0.10	6	1.125	1.232	1.316	1.378
0.20	12	1.064	1.125	1.181	1.232
0.30	18	1.043	1.085	1.125	1.163
0.40	24	1.033	1.064	1.095	1.125
0.50	30	1.026	1.052	1.077	1.101
0.75	45	1.018	1.035	1.052	1.068
1.00	60	1.013	1.026	1.039	1.052

Tabla 3. Valores típicos de D_f [3].

4.11 Potencial Máximo de la Malla (GPR).

La elevación de potencial de tierra, GPR, se determina mediante la ecuación (22).

$$GPR = I_G * R_g \quad (22)$$

Donde:

I_G es la corriente máxima de malla [A].

R_g es la resistencia de la malla [Ω].

Si el valor de la máxima elevación del potencial de tierra del diseño preliminar está por debajo de la tensión de toque tolerable por el cuerpo humano, ya no es necesario realizar análisis adicionales y se procede a colocar a tierra los equipos.

4.12 Tensión de paso y de contacto reales

Para calcular la tensión de paso real se utiliza la ecuación (23).

$$E_s = \frac{\rho * K_s * K_i * I_G}{L_s} \quad (23)$$

Donde:

E_s es la tensión de paso [V].

ρ es la resistividad del terreno [$\Omega \cdot m$].

K_s es el factor de espaciamiento para la tensión de paso.

K_i es el factor de corrección para la geometría de la malla.

I_G es la corriente máxima de la malla [A].

L_s es la longitud efectiva del conductor para la tensión de paso [m].

Para mallas con o sin varillas de aterrizaje, la longitud enterrada efectiva, L_s se calcula mediante la ecuación (24).

$$L_s = 0.75 * L_C + 0.85 * L_R \quad (24)$$

Donde:

L_C es la longitud total del conductor de la malla [m].

L_R es la longitud total de todas las varillas de aterrizaje [m].

El factor de espaciamiento para la tensión de paso K_s se calcula de con la ecuación (25).

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2 * h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{D} * (1 - 0.5^{n-2}) \right) \quad (25)$$

Donde:

h es la profundidad a la que se encuentra enterrada la malla [m].

D es el espaciamiento entre conductores paralelos [m].

n es el numero efectivo de conductores paralelos en una malla.

El factor de corrección para la geometría de la malla K_i se calcula por medio de la ecuación (26).

$$K_i = 0.644 + 0.148 * n \quad (26)$$

El cálculo de la tensión de contacto real se determina mediante la ecuación (27).

$$E_m = \frac{\rho * K_m * K_i * I_G}{L_M} \quad (27)$$

E_m es la tensión de contacto [V].

K_m es el factor de espaciamento para la tensión de contacto.

L_M es la longitud efectiva del conductor de la malla para la tensión de contacto [m].

El factor de espaciamento para la tensión de contacto K_m , se calcula de la siguiente manera:

$$K_m = \frac{1}{2 * \pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16 * h * d} + \frac{(D + 2 * h)^2}{8 * D * d} - \frac{h}{4 * d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} * \ln \left(\frac{8}{\pi(2 * n - 1)} \right) \right] \quad (28)$$

Donde:

d es el diámetro del conductor de la malla [m].

K_{ii} es el factor de ponderación correctivo que se ajusta para efectos de conductores internos.

K_h es el factor de ponderación correctivo que hace hincapié en los efectos de la profundidad de la malla.

El factor de ponderación correctivo, K_{ii} para mallas con varillas de aterrizaje a lo largo de su perímetro, o para mallas con varillas de aterrizaje en sus esquinas o dentro de la misma es:

$$K_{ii} = 1$$

Mientras que, para mallas sin varillas de aterrizaje o mallas con pocas varillas de aterrizaje, ninguna de ellas colocadas en las esquinas o en el perímetro, K_{ii} se calcula con la ecuación (29).

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 * n)^{\frac{2}{n}}} \quad (29)$$

Para calcular K_h se utiliza la ecuación (30).

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (30)$$

Donde, $h_0 = 1m$ (profundidad de referencia de la malla).

El número efectivo de conductores paralelos en una malla n se calcula con la ecuación (31).

$$n = n_a * n_b * n_c * n_d$$

Donde:

$$n_a = \frac{2 * L_c}{L_p} \quad (31)$$

$n_{b=1}$ Para mallas cuadradas.

$n_{c=1}$ Para mallas cuadradas y para mallas rectangulares.

$n_{d=1}$ Para mallas cuadradas, para mallas rectangulares y para mallas en forma de "L".

De otra manera:

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 * \sqrt{A}}} \quad (32)$$

$$n_c = \left(\frac{L_x * L_y}{A} \right)^{\frac{0,7 * A}{L_x + L_y}} \quad (33)$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (34)$$

Donde:

L_c es la longitud total del conductor de la malla [m].

L_p es la longitud perimetral de la malla [m].

A es el área de la malla [m^2].

L_x es la longitud máxima de los conductores de malla en dirección de x [m].

L_y es la longitud máxima de los conductores de malla en dirección de y [m].

D_m es la distancia máxima entre dos puntos cualesquiera de la malla [m].

Para mallas sin varillas de aterrizaje o mallas con tan solo algunas varillas dispersas a lo largo de la malla, pero colocadas en las esquinas o sobre todo

el perímetro de la malla, la longitud efectiva del conductor de la malla para la tensión de contacto, L_M , es:

$$L_M = L_C + L_R \quad (35)$$

Donde:

L_C es la longitud total del conductor de la malla [m].

L_R es la longitud total de todas las varillas de aterrizaje [m].

Para mallas con varillas de aterrizaje en las esquinas, así como los largos de su perímetro y sobre toda la malla, la longitud efectiva del conductor de la malla para la tensión de contacto L_M se calcula mediante la ecuación (36).

$$L_M = L_C + \left[1.55 + 1.22 * \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] * L_R \quad (36)$$

L_r es la longitud de cada varilla de aterrizaje [m].

5. Metodología

Se realizó una búsqueda de información técnica de sistemas de puesta tierra en redes de distribución, en normas tales como la IEEE 80, la IEEE 81, RETIE y demás normas vigentes. Mediante la información obtenida se procedió a establecer los conceptos y formulación matemática necesaria para el diseño de sistemas de puesta a tierra en redes de distribución.

Después se elaboró una herramienta computacional de fácil comprensión y manejo donde se efectúan todos los cálculos necesarios para obtener un correcto diseño de un sistema de puesta a tierra en redes de distribución eléctrica que cumplan con las normas vigentes, para su mayor comprensión se realizó un manual donde se explica su funcionamiento.

Posteriormente se realizó la implementación del sistema de puesta a tierra, para esto se siguieron los siguientes pasos.

5.1 Mediciones de campo de la resistividad del terreno

La medición de la resistividad del terreno se realizó mediante un telurómetro digital. Este equipo obtiene la resistividad del terreno directamente utilizando el método de cuatro puntos del arreglo de Wenner.

Las mediciones se realizaron en la vereda Tesalia en Orito Putumayo. Con un espaciamiento de las picas de 1m, 2m y 3m en cuatro direcciones diferentes tal como se indicia en la Figura 10.

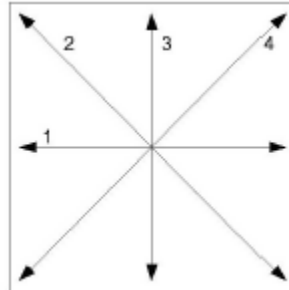


Figura 10. Direcciones de las mediciones de la resistividad del terreno.

Se obtuvieron las mediciones mostradas en la Tabla 4.

Resistividad del terreno					
Separación (m)	Resistividad dirección 1 ($\Omega\cdot m$)	Resistividad dirección 2 ($\Omega\cdot m$)	Resistividad dirección 3 ($\Omega\cdot m$)	Resistividad dirección 4 ($\Omega\cdot m$)	Resistividad promedio ($\Omega\cdot m$)
1	42,30	46,30	49,90	45,60	46,03
2	49,10	54,60	53,80	55,00	53,13
3	49,50	62,10	61,60	59,20	58,10

Tabla 4. Mediciones de la resistividad del terreno.

5.2 Modelación del terreno

Con ayuda de la herramienta computacional, se obtiene la resistividad aparente por el modelo de terreno uniforme con base a la ecuación (3) y la resistividad aparente para el modelo de dos capas mediante el método gráfico de Sunde, siguiendo los pasos establecido en 4.3.2 y con los datos presentados en la Tabla 5, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 6.

Numero de medidas	ρ_1 ($\Omega\cdot m$)	ρ_2 ($\Omega\cdot m$)	ρ_2/ρ_1	ρ_a/ρ_1	a/h
3	46.03	58.10	1.26	1.17	3.4

Tabla 5. Datos de entrada para el cálculo de la resistividad aparente.

Resistividad aparente por el modelo de terreno uniforme ($\Omega\cdot m$)	52,42
Resistividad aparente por el método gráfico de sunde ($\Omega\cdot m$)	53,85

Tabla 6. Resistividad aparente por el modelo de terreno uniforme y de dos capas.

Debido a la variación existente entre los datos de las mediciones de la resistividad del terreno de la Tabla 4, se toma el valor de la resistividad aparente de dos capas obtenida por el método de Sunde que es de 53,85 [$\Omega\cdot m$] para los posteriores calculos.

5.3 Calculo del calibre del conductor

Para el calculo del calibre del conductor es necesario los datos de mostrados en la Tabla 7 y la aplicación de la ecuacion (4). La corriente de falla en el punto de conexión del sistema de puesta tierra se obtuvo mediante el programa SPARD POWER y se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 11, donde la corriente de falla monofasica es de 0.127 kA y la corriente trifasica es de 0.234 kA, siendo la mas alta la corriente trifasica y con la cual se calcula el calibre del conductor.

Según la Tabla 3 considerando $X/R=10$ y una duración de falla $t_f=0.5$ segundos, el factor de decrecimiento es $D_f=1.676$ y los datos de las constantes de material tomados de la Tabla 1 para un cable con recubrimiento de zinc que es el mas similar al utilizado por la empresa para los sistemas de puesta a tierra en distribución, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 8, donde se observa que la corriente de falla asimétrica I_F es de 0.39 KA y la sección transversal minima del conductor calculada es de 4.01 mm^2 .

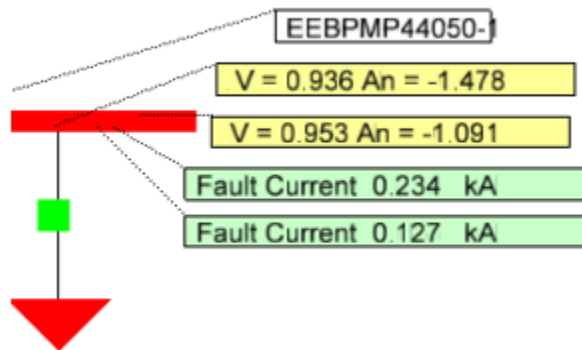


Figura 11. Corrientes de falla en el punto de conexión.

Datos de entrada	
If	0.234 KA
X/R	10
tf	0.5 seg
Df	1.676
TCAP	3.9 J/cm ³ ·°C
αr	0.0032 °C
pr	20.1 μΩ·cm
Ko	293 °C
Tm	419 °C
Ta	30 °C

Tabla 7. Datos de entrada para el cálculo del calibre del conductor.

Calculos	
IF	0.39 KA
Sección transversal mínima calculada	4.01 mm ²
Sección transversal seleccionada	51.15 mm ²

Tabla 8. Cálculo de la sección transversal mínima del conductor.

Debido a que la empresa se utiliza un cable de acero galvanizado 3/8", se verifica que se sección transversal sea mayor a la calculada mediante la

Tabla 9, donde se puede observar que la sección transversal del cable es de 51.15 mm^2 , cumpliendo con el requisito.

Descripción	Unidad	Datos Técnicos
Normas		ASTMT A475
Material del conductor		Acero galvanizado
Tipo de cableado		6/1
Tamaño del conductor	Inch (")	3/8"
Diámetro del alambre de acero	mm	3.05
Numero de hilos		7
Tolerancia del alambre de acero	mm	± 0.04
Tensión de rotura	KN	105
Diámetro de hilo aprox.	mm	9.2
Sentido del cableado, última capa		Izquierda
Radio del cableado	mm	14.5
Paso de cableado	mm	135
Tipo de galvanizado		Clase A
Tipo de resistencia	Ω/km	3.75
Densidad de zinc	gr/m^2	259
Sección del cable	mm^2	51.15
Módulo de elasticidad final	daN/mm^2	18130
Coefficiente de expansión lineal	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	11.5×10^{-6}
Peso del cable	kg/m	0.407

Tabla 9. Ficha técnica cable acerado galvanizado 3/8" [6].

5.4 Cálculo de tensiones tolerables

Para el cálculo de las tensiones de paso y de contacto tolerables se utiliza el caso más crítico que corresponde para una persona con peso corporal de 70 Kg por lo tanto se utilizan las ecuaciones 6 y 8 respectivamente, los resultados obtenidos mediante la herramienta computacional se muestran en la Tabla 10.


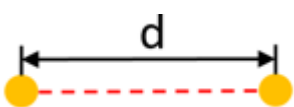
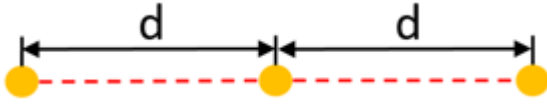
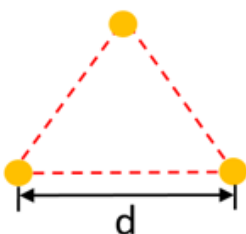
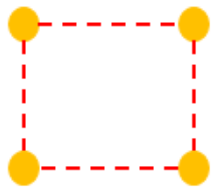
Estimado		
$E_{\text{paso}70\text{kg}}$	3000,55	V
$E_{\text{contacto}70\text{kg}}$	916,66	V

Tabla 10. Resultados obtenidos de tensiones de paso y contacto.

5.5 Cálculo de la resistencia de puesta a tierra para las diferentes configuraciones.

Debido a que el sistema de puesta a tierra servirá para aterrizar un transformador de 250 KVA que será instalado en la vereda Tesalia en Orito Putumayo y siguiendo lo estipulado en Tabla 2 del RETIE, el valor máximo de resistencia de puesta a tierra que se puede tener es de 10Ω para una subestación de media tensión. Por lo tanto, el propósito de es obtener una resistencia de puesta a tierra menor o igual a 10Ω mediante las diferentes disposiciones y formulas presentadas en el inciso 4.9.

Los diseños están conformados por varillas con una longitud de 2.4m X 5/8" y los conductores son enterrados a una profundidad de $h=0.25$ m. La resistencia de puesta a tierra se calculó con las siguientes configuraciones: 1 varilla en vertical, 2 varillas en paralelo, 3 varillas en paralelo, 3 varillas en triangulo y malla rectangular con 4 varillas, todas separadas a una distancia de 3 metros, $d=3$.

Configuración	Resistencia calculada [Ω]
1 varilla en vertical 	21.78
2 varillas en paralelo 	12.78
3 varillas en paralelo 	9.06
3 varillas en triangulo 	6.17
Malla rectangular con 4 varillas 	6.05

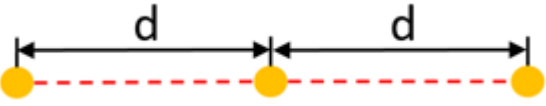
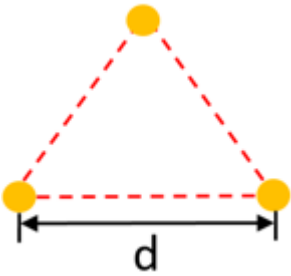
--	--

Tabla 11. Resistencias de puesta a tierra calculadas.

Los resultados obtenidos de la Tabla 11, se realizaron con ayuda de la herramienta computacional. Además, en la Tabla 11 podemos observar que las configuraciones que presentan una resistencia menor o igual a 10Ω son, 3 varillas en paralelo, 3 varillas en triangulo y malla rectangular con 4 varillas.

5.6 Potencial máximo de las configuraciones.

Se calculó el potencial máximo mediante la ecuación (22) y con ayuda de la herramienta computacional, para cada una de las resistencias de puesta a tierra calculadas en la Tabla 11 que sean mayores o igual a 10Ω , los resultados obtenidos se aprecian en la Tabla 12.

Configuración	Resistencia calculada [Ω]	Potencial máximo calculada [V]
3 varillas en paralelo 	9.06	3553,19
3 varillas en triangulo 	6.17	2419,78
Malla rectangular con 4 varillas	6.05	2372,71

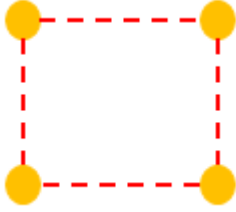
		
---	--	--

Tabla 12. Cálculo del potencial máximo.

5.7 Control del diseño de puesta a tierra.

Antes de la implementación del diseño de puesta a tierra es necesario verificar que la tensión de contacto para una persona que pesa 70 kg sea mayor al potencial máximo calculado, esta comprobación se realizó para cada uno de los diseños de la Tabla 11, obteniendo los siguientes resultados:

- 3 varillas en paralelo

$$\text{Potencial maximo} = 3517,89[V] > E_{\text{contacto}70kg} = 916,66[V]$$

- 3 varillas en triangulo

$$\text{Potencial maximo} = 3255,13[V] > E_{\text{contacto}70kg} = 916,66[V]$$

- Malla rectangular con 4 varillas

$$\text{Potencial maximo} = 2372,71[V] > E_{\text{contacto}70kg} = 916,66[V]$$

Como se puede observar en los anteriores resultados el valor de la elevación del potencial de tierra está por encima del valor de la tensión de contacto tolerable por el cuerpo humano, por lo que es necesario continuar con el diseño mediante el cálculo de tensiones de paso y de contacto reales.

5.8 Tensiones de paso y de contacto reales

Debido a que el cálculo para las tensiones de paso y contacto reales realizados mediante las ecuaciones (23) y (27) es necesario una malla de puesta a tierra en disposición rectangular. Se opta por seguir el diseño con los datos obtenidos para la configuración de la malla rectangular de 4 varillas, los parámetros de entrada utilizados por la herramienta computacional para realizar los cálculos se muestran en la Tabla 13.

Datos de entrada	
Lc	12 m
LR	7,2 m
h	0,25 m
D	3 m
n	2
IG	392,18 A
d	0,0074 m
Lx	3 m
Ly	3 m

Tabla 13. Datos de entrada para el cálculo de tensiones de paso y contacto reales.

Mediante los datos de entrada de la Tabla 13, mediante la herramienta computacional se calculan los factores que se muestran en la Tabla 14 que son necesarios para poder aplicar las fórmulas de las tensiones de paso y contacto reales.

Calculos	
Ls	15,12 m
Ks	0,73
Ki	0,94
Km	0,92
Kii	1
Kh	1,12
LM	26,89 m
Cs	0,70

Tabla 14. Factores para el cálculo de tensiones de paso y contacto reales.

Con los datos de entrada de la Tabla 13 y los factores calculados de la Tabla 14 se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 15, estos resultados se obtuvieron mediante la herramienta computacional.

Reales	
E _{paso}	964,45 V
E _{contacto}	675,95 V

Tabla 15. Tensiones de paso y de contacto reales calculados.

5.9 Control de seguridad

Para verificar que el diseño sea correcto debe cumplir lo establecido en la norma IEEE Std 80 de 2013, la cual establece que la tensión de contacto real tiene que ser menor a la tensión de contacto tolerable, además la tensión de paso real tiene que ser menor a la tensión de paso tolerable.

- $E_{\text{contacto}} = 675,95[V] < E_{\text{contacto}70kg} = 916,66[V]$
- $E_{\text{paso}} = 964,45[V] < E_{\text{paso}70kg} = 3000,55[V]$

Como se puede constatar en las anteriores dos expresiones el diseño cumple con los requisitos establecidos en la IEEE Std 80 de 2013 y se puede implementar.

5.10 Implementación del sistema de puesta a tierra

Una vez verificado el diseño se procedió a su implementación en el lugar de interés, esto se realizó con ayuda del personal técnico de la Empresa de Energía del Bajo Putumayo, a quienes se les explico en qué consistía la actividad y las pautas que debían seguir para la correcta implementación, en la Imagen 1 y la Imagen 2 se refleja el trabajo realizado.



Imagen 1. Implementación del sistema de puesta a tierra.



Imagen 2. Implementación del sistema de puesta a tierra.

5.11 Medición de la resistencia de puesta a tierra



Imagen 3. Resistencia de puesta a tierra medida.

Para realizar la medición de la resistencia de puesta a tierra en el sitio donde se implementó el sistema de puesta a tierra se realizó con ayuda del personal técnico de la empresa y del telurómetro digita que tiene la opción de medir dicha resistencia de una forma directa, en la Imagen 3 se observa que se obtuvo un valor de 5,67 [Ω], presentando un valor menor a 10 [Ω] que era el objetivo para este diseño.

6. Resultados y análisis

Tabla resumen de resultados	
Denominación	Valor
Resistencia de puesta a tierra calculada	6,05 [Ω]
Resistencia de puesta tierra medida	5,67 [Ω]
Tensión de paso tolerable	3000,55 [V]
Tensión de contacto tolerable	916,66 [V]
Tensión de paso real	964,45 [V]
Tensión de contacto real	675,95 [V]
Potencial máximo de la malla	2372,71 [V]

Tabla 16. Tabla resumen de resultados para una malla rectangular de 4 varillas.

Como se analizó en el anterior ítem 5 se logró obtener un diseño que cumple con los requerimientos establecidos en la IEEE Std 80 de 2013, debido a que las tensiones de paso y contacto reales son menores a las tolerables tal como se puede analizar en la Tabla 16.

Además, en la Tabla 15 se observa el valor de puesta a tierra calculada mediante la herramienta computacional que es igual a 6,05 [Ω] y la resistencia de puesta a tierra medida mediante el telurómetro digital que es igual a 5,67 [Ω]. Donde la resistencia de puesta a tierra medida es menor a la calculada lo cual es beneficio ya que se tiene un margen de error. El error presentado entre la resistencia de puesta a tierra calculada y medida de 0.38 [Ω], al ser un error relativamente pequeño se puede dar validez a las ecuaciones planteadas y a la herramienta computacional desarrollada.

7. Conclusiones

Mediante la búsqueda de información en fuentes confiables como, la IEEE 80, la IEEE 81, el RETIE, entre otras, se logró desarrollar un método para el diseño de puestas a tierra en redes de distribución eléctrica para la Empresa de Energía del Bajo Putumayo.

Mediante Excel se realizó una herramienta computacional de fácil manejo que permite realizar las operaciones matemáticas necesarias para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra de una forma fácil y eficiente.

Se logró socializar el método desarrollado y la herramienta computacional con los encargados de la implementación de los sistemas de puesta a tierra dentro de la empresa, dando una descripción paso a paso para el correcto diseño de puesta a tierra.

Mediante la herramienta computacional se calculó, diseño y determino una resistencia de puesta a tierra menor o igual de 10 [Ω], debido a que según lo establecido en el RETIE esté sera el valor maximo de la resistencia para transformadores de media tensión.

Se implemento el diseño de puesta a tierra en el lugar de interes logrando tener resultados muy similares entre la resistencia de puesta a tierra medida y calculada. Por lo tanto se puede dar validez al metodo planteado a sus ecuaciones y a la herramienta computacional desarrollada.

8. Otras actividades realizadas en la practica acamedica

8.1 Creación de procedimientos e instructivos

A lo largo de la práctica académica se desarrollaron procedimientos e instructivos para el correcto desarrollo de las actividades realizadas por los tecnicos encargados en el mantenimientos de las redes electricas de distribución. Estos eran desarrollados con base a la busqueda de informacion confiable y con ayuda del Ingeniero de manteminimiento, profesionales en el area de seguridad y salud laboral y en el conominiento del personal tecnico. Una vez desarrollados eran dados a conocer al personal tecnico para que tengan conocimiento del correcto procedimiento. Además era necesario ir a supervisar que la actividad a desarrollar fuera realizada con base a lo estipulado en el instructivo o procedimiento, a continuación se numeran algunos de los procedimientos e instructivos desarrollados.

- Instructivo para el cambio de red abierta a trenzada.
- Instructivo para la instalación de caja de derivación.
- Instructivo para el balanceo de circuitos en baja tensión.
- Instructivo para maniobras seguras en seccionadores.
- Procedimiento para el diagnostico, planeación y organización del trabajo.

Ademas se presentan a continuación algunas fotos tomadas de la supervision de las actividades.



Imagen 4. Instalación caja de derivación.



Imagen 5. Cambio de red abierta a trenzada.



Imagen 6. Balanceo de circuitos.



Imagen 7. Instalación red de media tension.

Amarillado de tren de celdas de 13.8 KV subestación la Hormiga

La empresa encargada en la implementación de las celdas de 13.8 KV en la subestación la Hormiga fue SIEMENS, la cual entrego los diagramas unifilares de cada una de las celdas. Para realizar una supervisión de la correcta instalacion de las celdas se realizo un amarillado de los planos uniflares, donde mediante un resaltador amarillo se señalaba las conexiones existentes tanto en plano unifilar y en la conexión física de la celda, rojo si la conexión esta en la celda pero no se mostraba en el plano unifilar y verde para las conexiones presentes en el plano pero no en la conexión física, en Figura 12 se presenta un ejemplo de este proceso, donde se observa se puede observar en color verde dos conexiones que están en el plano conectadas al elemento Q8 pero no existe en la conexión física de la celda.

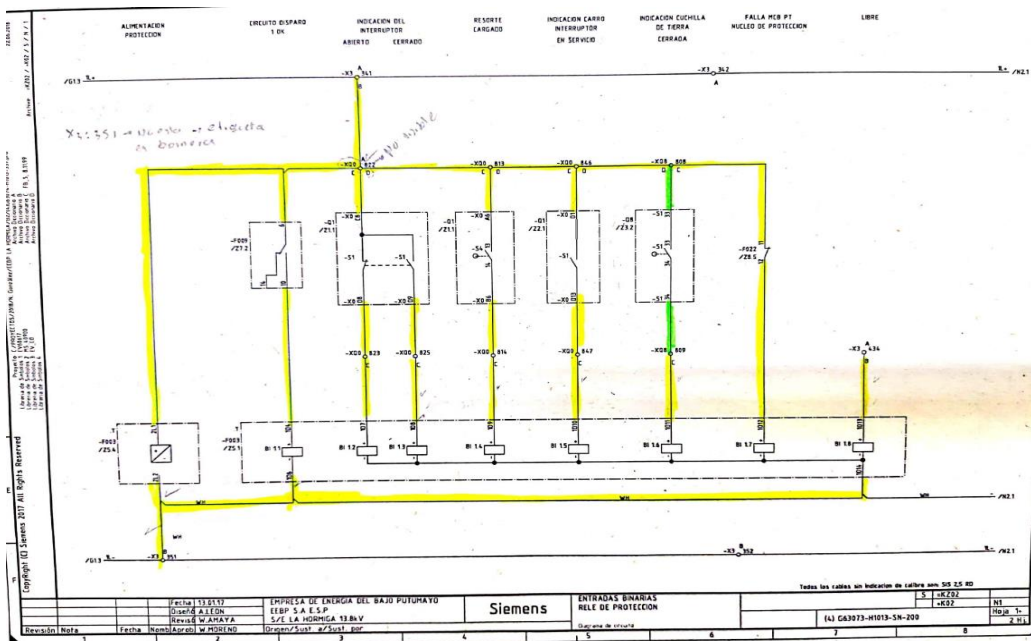


Figura 12. Amarillado del plano unifilar.

Análisis apoyo de fallas en reles

Se apoyo el análisis de fallas de los reles de protección de las subestaciones mediante la recolección de información obtenida de oscilografías como la mostrada en la Figura 13, tal como el tiempo y tipo de protección que actuó en cada evento, además de las causas y corrientes de falla. Con el fin de identificar anomalías en los reles.

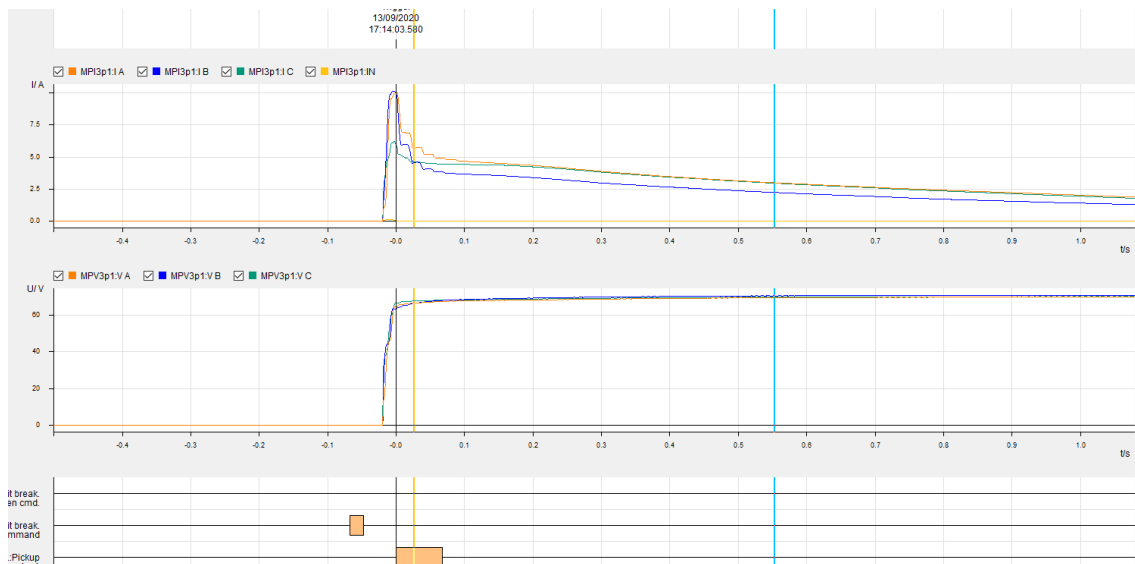


Figura 13. Oscilografía relé de protección.

9. Referencias Bibliográficas

- [1] Ministerio de Minas y Energía (2013). Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE. Bogota, Colombia: Ministerio de Minas y Energía. [En línea]. Available: <https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/1179442/Anexo+General+del+RETIE+vigente+actualizado+a+2015-1.pdf/57874c58-e61e-4104-8b8c-b64dbabedb13>
- [2] Empresas Publicas de Medellin (2008). Medida de Resistividad Eléctrica del Suelo " Ra6-014" [en línea]. Available: https://www.epm.com.co/site/Portals/0/centro_de_documentos/proveedores_y_contratistas/normas_y_especificaciones/normas_aereas/grupo_6_Normas_de_montajes_complementarios/RA6-014MEDIDADERESISTIVIDAD_V3.pdf
- [3] S. Committee, *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE Standard (80-2000)*, vol. 56. 2000. [En línea]. Available: <https://standards.ieee.org/standard/80-2013.html>
- [4] IEEE Std 81, *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System*, vol. 2012, no. December. 2012. [En línea]. Available: <https://standards.ieee.org/standard/81-2012.html>
- [5] F. M. Sinchi Sinchi, "Diseño y determinación de sistemas de puesta a tierra mediante pruebas de campo con elementos comunes utilizados en la región, incluyendo GEM y electrodo químico," 2017, [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/14487>.
- [6] C. D. E. Acero, C. O. N. Alma, C. A. P. Máxima, and C. A. P. Máxima, "Ficha técnica cables de acero," vol. 01, no. 81, pp. 1–8. [En línea]. Available: <https://dogotuls.com.mx/media/Fichastec/CABLE-FIT-WEB.pdf>

Visto bueno del asesor interno y asesor externo

Como asesor conozco la propuesta y avalo el contenido de la misma.

Álvaro Jaramillo Duque _____

Nombre del asesor interno

C.C.

Firma del asesor interno

Nombre del asesor interno

C.C.

Firma del asesor interno